

Modelo de cálculo analítico de ligações soldadas com base no método das tensões admissíveis em regime elástico linear

Analytical calculation model of welded connections based on the permissible stress method in linear elastic range

DOI:10.34117/bjdv7n2-571

Recebimento dos originais: 10/01/2021

Aceitação para publicação: 25/02/2021

Felipe Borges Fonseca

Discente do curso de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica pela
Universidade de Taubaté – UNITAU
Instituição: Universidade de Taubaté - UNITAU
Endereço: Rua Jacina, 106 – São Paulo - SP, Brasil
E-mail: felipevice713@gmail.com

Horácio Ferreira Dias Gonçalves

Discente do curso de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica pela
Universidade de Taubaté - UNITAU
Instituição: Universidade de Taubaté - UNITAU
Endereço: Rua das Graunas, 70, Cond. de Chácaras Bartira, Embú das Artes - SP,
Brasil
E-mail: hfdgoncalves@metrosp.com.br

Claudete Oliveira Kenvyn

Professora Me. da Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba
Instituição: Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba - FATEC
Endereço: Av. Antônio Pinheiro Júnior, 1805, Pindamonhangaba - SP, Brasil
E-mail: claudete.kenvyn@gmail.com

Cristian Cley Paterniani Rita

Professor Me. da Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba
Endereço: Antônio Teixeira de Souza, 240. Beira Rio II - Guaratinguetá - SP, Brasil
Instituição: Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba - FATEC
E-mail: cristian.paterniani@fatec.sp.gov.br

Wendell de Queiróz Lamas

Professor Dr. da Escola de Engenharia de Lorena – EEL-USP
Endereço: Estrada Municipal do Campinho, s/n. Ponte Nova – Lorena - SP, Brasil
Instituição: Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo – EEL-USP
E-mail: wendell.lamas@usp.br

José Rubens Camargo

Professor Dr. da Universidade de Taubaté - UNITAU
Instituição: Universidade de Taubaté - UNITAU
Endereço: Rua Daniel Danieli, S/N, Taubaté - SP, Brasil
E-mail: jrubenscamargo@gmail.com

RESUMO

O correto dimensionamento e detalhamento de ligações metálicas são essenciais para um bom funcionamento da estrutura, para que o modelo de cálculo seja válido, é necessário garantir que as condições de contorno impostas (também chamadas de vínculo) sejam compatíveis com os deslocamentos prescritos, pois elas governarão a resposta estrutural do modelo, como por exemplo, a linha elástica, diagramas de momento fletor, momento torçor, esforço cortante e esforço normal. Os cálculos foram executados conforme a norma brasileira NBR 8800 (2008), norma americana AISC (1986), a norma Eurocode 3 (2005), o manual de construção em aço (2011). O resultado para a taxa de utilização mecânica encontrado foi de 86,23% para uma faixa de 0 a 100%, mostrando ser um bom resultado para apenas 6 mm de filete de solda. Conclui-se que o método de cálculo analítico apresentado, possui como vantagem, a simplicidade do modelo matemático e conservadorismo.

Palavras-chave: Método das tensões admissíveis, Cálculo de ligações metálicas.

ABSTRACT

The correct dimensioning and detailing of metallic connections are essential for a good functioning of the structure, so that the calculation model is valid, as it is necessary to ensure that the boundary conditions imposed (also called a link), as they will govern the structural response of the model, such as the elastic line, bending moment diagrams, torsional moment, shear and normal effort. The calculations were performed according to the Brazilian standard NBR 8800 (2008), American standard AISC (1986), the Eurocode 3 standard (2005), the steel construction manual (2011). The result for the mechanical utilization rate found was 86.23% for a range from 0 to 100%, showing that it is a good result for only 6 mm of weld fillet. It is concluded that the analytical calculation method presented, has as an advantage, the simplicity of the mathematical model and conservatism.

Keywords: Allowable stresses method, Calculation of metallic connections.

1 INTRODUÇÃO

É fato que o comportamento mecânico das ligações influi sensivelmente na distribuição de esforços e deslocamentos das estruturas, tornando-se essencial o conhecimento da rigidez e da capacidade de rotação da ligação, pois a análise de esforços deve incluir a influência do comportamento das ligações estão dimensionadas a análise pode ser feita baseada no comportamento estimado (MANUAL DE CONSTRUÇÃO EM AÇO, 2011).

Para tanto, é necessário a caracterização dos tipos de solicitação existentes, para então, partir para o modelo de cálculo que obtém a melhor resposta para cada situação correspondente. A norma americana AISC (1986) e a norma brasileira NBR 8800 (2008) possuem procedimentos analíticos de fácil aplicação, e que em geral atendem a maioria dos casos práticos, pois as normas realizam diversos experimentos que são traduzidos em curvas e procedimentos que se adaptam muito bem as construções em aço.

A base para todos os procedimentos de cálculo que serão demonstrados a seguir, parte da concepção de esforços centrados (onde a força coincide com o centro geométrico do elemento solicitado), pois a partir deste entendimento é possível extrapolar para análise de esforços excêntricos, onde surgem outros esforços solicitantes além do esforço normal e cortante, daí vem a necessidade de avaliar individualmente o comportamento de cada elemento que compõe a ligação. A Figura 1 demonstra as duas hipóteses mencionadas.

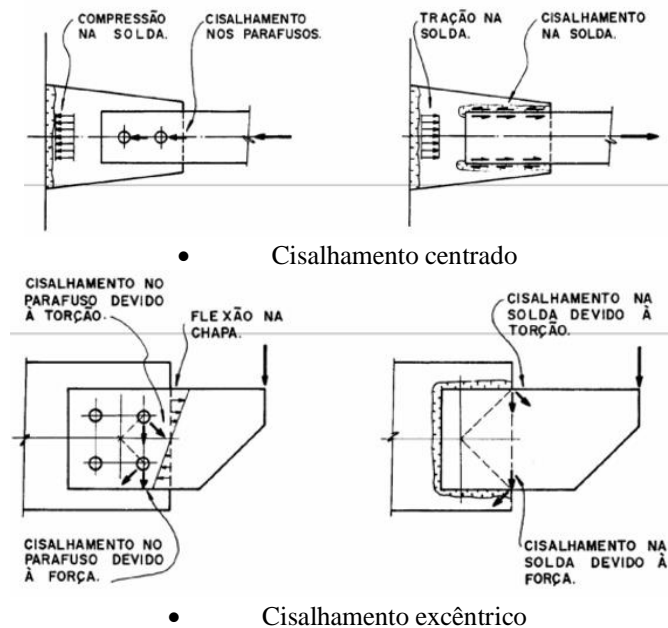


Figura 1 – Tipos de esforços solicitantes.
Fonte: Manual de construção em aço (2011).

2 METODOLOGIA

2.1 DEFINIÇÃO DA RIGIDEZ DA LIGAÇÃO

O conhecimento da rigidez das ligações é fundamental para a escolha do sistema estrutural mais adequado, para tanto, é necessário que a ligação se comporte conforme hipóteses feitas para os nós que fazem intersecção com as barras. Nos locais onde foram previstas ligações rígidas, deverão ser previstos detalhes que efetivamente impeçam a rotação das ligações, assim como o inverso, onde houver ligação flexível, a ligação deve permitir a rotação relativa entre as partes (MANUAL DE CONSTRUÇÃO EM AÇO, 2011). Depois de calculado as ligações, caso seu comportamento não seja consistente com o estimado, a estrutura deverá ser novamente dimensionada até que se atinja a convergência.

A norma NBR 8800 (2008) define intervalos de rigidezes com base na correlação experimental normalizada em termos de momento rotação, conforme apresentado na Figura 2.

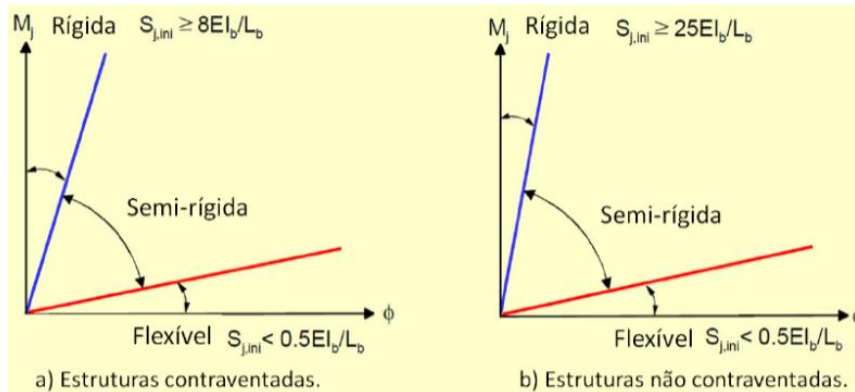


Figura 2 – Momento versus Rotação.
Fonte: Adaptado pelo autor, Eurocode 3 (2005).

Onde:

$S_{j,ini}$ = Rigidez inicial da ligação (reta tangente na origem);

E = Módulo de elasticidade;

I_b = Momento de inércia da viga;

L_b = Comprimento da viga.

Com base na teoria das estruturas e resistência dos materiais, é possível elucidar o gráfico acima com as equações de momentos nos apoios, das situações diametralmente opostas, ou seja, quanto a ligação extremamente rígida, quanto a flexível. A Figura 3 demonstra este conceito.

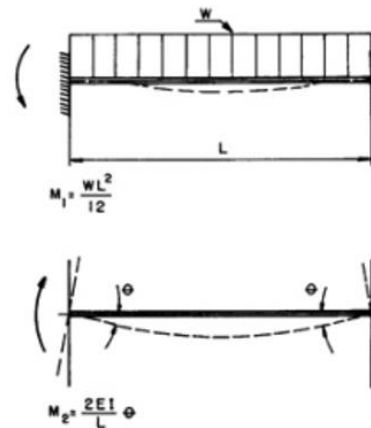


Figura 3 - Ligação engastada com alívio de momento nos apoios.
Fonte: Eurocode 3 (2005).

O momento ponderado será a diferença entre ambos, apresentados pelas equações 1 a 3:

$$M = M_1 - M_2 = \frac{WL^2}{12} - \frac{2EI\Theta}{L} \quad \text{Eq. (1)}$$

Para $\Theta = 0$ (ligação teoricamente rígida):

$$M = \frac{WL^2}{12} \quad \text{Eq. (2)}$$

Para $M = 0$ (ligação teoricamente flexível):

$$\Theta = \frac{WL^3}{24EI} \quad \text{Eq. (3)}$$

2.2 RESISTÊNCIA DE SOLDAS DE FILETE

A norma NBR 8800 (2008) define que as equa es 4 e 5 são para o dimensionamento de soldas, e terá como base o dois Estado Limite  ltimo (ELU).

- **Ruptura da solda na se o efetiva**

$$F_{w,Rd} = \frac{0,6Awfw}{\gamma_w2} \quad \text{Eq. (4)}$$

- **Escoamento do metal base na face de fusão**

$$F_{Rd} = \frac{0,6Ambfy}{\gamma_{a1}} \quad \text{Eq. (5)}$$

O fator 0,60 é proveniente do critério de resistência de von Mises aplicado ao caso de cisalhamento puro.

A resistência de cálculo a cisalhamento é dada pelo menor valor entre os valores obtidos. A Figura 4 demonstra o conceito abordado.

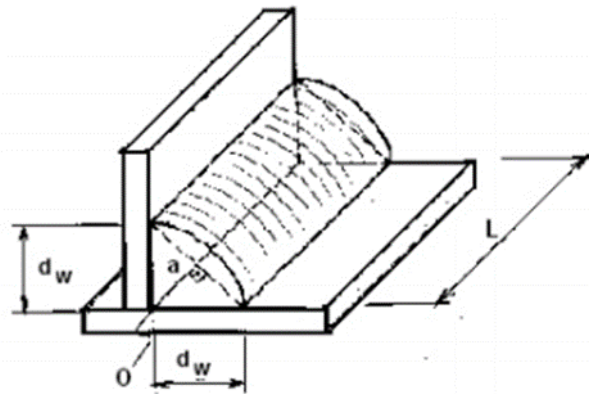


Figura 4 - Filete de solda.

Fonte: Eurocode 3 (2005).

Sendo:

$A_w = l_w a$ = Área efetiva da solda de filete calculada, como o produto do comprimento total da solda e a espessura da garganta efetiva;

$A_{MB} = l_w d_w$ = Área líquida do elemento sujeito a cisalhamento, como o produto do comprimento total da solda e o lado menos espesso da perna do filete;

f_w = Resistência mínima à tração do metal da solda;

d_w = Perna do filete ou dimensão;

a = Garganta efetiva de solda;

l_w = comprimento do filete.

A Tabela 1 correlaciona a classe de solda com sua resistência à tração.

Tabela 1 - Resistência à tração do metal de solda.

Metal da solda	f_w (MPa)
classe 6 ou 60 (AWS)	415
classe 7 ou 70 (AWS)	485
Classe 8 ou 80	550

Fonte: Manual de construção em aço (2011).

2.3 DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM UM GRUPO DE CORDÃO DE SOLDADA

A distribuição de tensões nos cordões de solda é complexa e não uniforme, pois elas variam com o ângulo da força aplicada. Cordões de solda longitudinais ($\Theta = 0$)

apresentam menor resistência e maior ductilidade do que os transversais ($\Theta = 90^\circ$), porém em termos práticos admite-se uma distribuição uniforme de tensões, independente da sua direção, pois adota-se o limite inferior, conforme Figura 5.

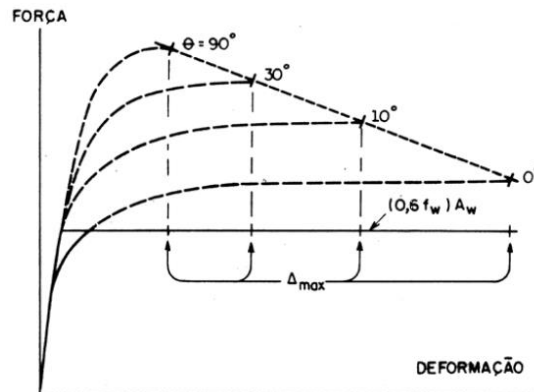


Figura 5 – Comportamento força versus deformação em cordões de solda.
Fonte: Manual de construção em aço (2011).

A norma NBR 8800 (2008), permite modificar a expressão comentada na equação 4 (modificada), computando o ganho de resistência adquirida em função do ângulo teta diferente de zero ($0 < \Theta < 90$), dada pela expressão:

$$\bullet \quad F_{w,Rd} = A_w(1+0,5\text{sen}1,5\Theta) \quad \text{Eq. (8)}$$

Para um grupo de filetes solicitados concêntricamente, formado por elementos situados longitudinalmente e transversalmente à direção da força aplicada, a força resistente de cálculo combinada é o maior valor entre:

$$\bullet \quad F_{w,Rd} = F_{wl,Rd} + F_{wt,Rd} \text{ e } 0,85F_{wl,Rd} + 1,5F_{wt,Rd} \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde:

$F_{wl,Rd}$ é a força resistente de cálculo total dos filetes situados longitudinalmente à direção da força aplicada;

$F_{wt,Rd}$ é a força resistente de cálculo total dos filetes situados transversalmente.

A norma NBR 8800 (2008) define a espessura mínima para a solda de filete em função da chapa menos espessa a ser soldada. A Tabela 2 relaciona a espessura entre filete e metal base:

Tabela 2 - Espessura mínima da garganta efetiva de uma solda de entalhe de penetração parcial.

Maior espessura do metal-base na junta (mm)	Espessura mínima da garganta efetiva (mm) ^(A)
Abaixo de 6,35 e até 6,35	3
Acima de 6,35 até 12,5	5
Acima de 12,5 até 19	6
Acima de 19 até 37,5	8
Acima de 37,5 até 57	10
Acima de 57 até 152	13
Acima de 152	16

Fonte: NBR8800 (2008).

2.4 EXEMPLO DE CÁLCULO

Será feita a verificação de um consolo metálico, com a chapa gusset soldada na mesa do pilar metálico (perfil H), suportando uma viga totalmente rotulada ($M=0$), mobilizando apenas esforço cortante. Entretanto, como a distância de aplicação da força não está agindo no centro de gravidade da chapa, haverá excentricidade e consequentemente esforços de flexão na chapa que conduzem ao cisalhamento excêntrico nos cordões de solda. A Figura 6 elucida o exposto.

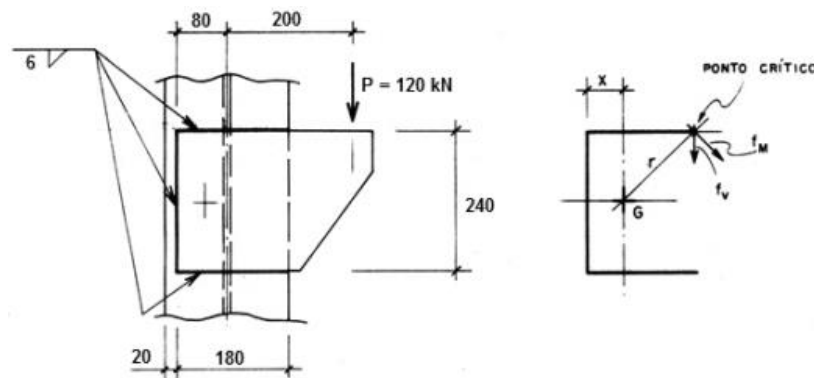


Figura 6 – Exemplo de cálculo de ligação.
Fonte: Manual de construção em aço (2011).

- **Eletrodos classe 60** → $f_w = 415 \text{ Mpa}$
- **Metal base: ASTM A36** → $f_y = 250 \text{ Mpa}$

Primeiro passo será encontrar a componente f_v , tensão uniformemente distribuída ao longo da solda.

- $$f_v = \frac{P}{A_w} \quad \text{Eq. (10)}$$

Depois a componente f_m , tensão devido ao momento de torção.

$$\bullet \quad f_m = \frac{M}{I_p} r \quad \text{Eq. (11)}$$

Após a obtenção das propriedades da seção, calcular-se-á as componentes de tensão, para enfim comparar com os valores de resistência admissíveis, começando com a componente centrada.

$$\bullet \quad f_v = \frac{P}{A_w} = \frac{120}{26,7} = 4,49 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{Eq. (20)}$$

$$\bullet \quad r = \sqrt{12^2 + 12,6^2} = 17,4 \text{ cm} \quad \text{Eq. (21)}$$

$$\bullet \quad f_M = \frac{M}{I_p} r = \frac{120 \times (28 - 5,4)}{3594} \times 17,4 = 13,13 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{Eq. (22)}$$

Sendo:

r = raio de torção

Decompondo as componentes de tensão, obtém-se.

$$\bullet \quad f_{M_x} = f_M \frac{y}{r} = 13,13 \times \frac{12}{17,4} = 9,05 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{Eq. (23)}$$

$$\bullet \quad f_{M_y} = f_M \frac{x}{r} = 13,13 \times \frac{12,6}{17,4} = 9,51 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{Eq. (24)}$$

Após obtenção das componentes, calcular-se-á a resultante da soma vetorial.

$$\bullet \quad f_w = \sqrt{f_{M_x}^2 + (f_{M_y} + f_v)^2} = \sqrt{9,05^2 + (9,51 + 4,49)^2} = 16,67 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{Eq. (25)}$$

Por fim f_{MB} , obter-se-á a tensão na face de fusão.

$$\bullet \quad f_{MB} = 0,707 f_w = 0,707 \times 16,67 = 11,78 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{Eq. (26)}$$

Em posse do resultado, compara-se com o valor resistente, conforme os estados limites aplicáveis.

Ruptura da seção líquida:

$$\bullet \quad F_{w,Rd} = \frac{0,6f_w}{\gamma_w} = \frac{0,6 \times 41,5}{1,35} = 18,44 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{Eq. (27)}$$

Escoamento na face de fusão:

$$\bullet \quad F_{MB,Rd} = \frac{0,6f_y}{\gamma_a} = \frac{0,6 \times 25}{1,1} = 13,66 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{Eq. (28)}$$

Por fim, adota-se o menor valor:

$$\bullet \quad F_{MB,Rd} = \frac{0,6f_y}{\gamma_a} = \frac{0,6 \times 25}{1,1} = 13,66 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{Eq. (29)}$$

Taxa de utilização mecânica:

$$\bullet \quad \frac{f_{MB}}{F_{MB,Rd}} = \frac{11,78}{13,66} = 86,23\%, \text{ portanto OK !! (Visto que o processo já inclui coeficientes de ponderação de esforços e minoração de resistência)} \quad \text{Eq. (30)}$$

3 CONCLUSÃO

Conclui-se que é necessária ter atenção especial com relação ao dimensionamento das ligações, pois elas influenciam diretamente na resposta global da estrutura. As condições de contorno consideradas previamente na concepção e modelagem precisam de fato se comportar conforme previsto, pois caso contrário, a estrutural “real” poderá apresentar diversas patologias como deformações excessivas, conseqüentemente levando a um colapso progressivo dependendo da criticidade.

Portanto, com base nos resultados obtidos, percebe-se que a solda possui elevada resistência, pois com poucos milímetros de cordão de solda, como neste exemplo de 6mm, é capaz de suportar cargas elevadas com segurança, lastreado em normas e procedimentos consolidados nacionalmente pela norma NBR 8800 (2008) e internacionalmente pela AISC (1986) e EUROCODE 3 (2005), com o benefício da versatilidade dos casos mais usuais de aplicação, e por fim, da simplicidade dos cálculos envolvidos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. AISC Manual of steel construction, load and resistance factor design. 1a edition. Chicago, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

MANUAL DE CONSTRUÇÃO EM AÇO. Ligações em Estruturas Metálicas – Volume 1, 4ª Edição. Rio de Janeiro 2011.

MANUAL DE CONSTRUÇÃO EM AÇO. Ligações em Estruturas Metálicas – Volume 2, 4ª Edição. Rio de Janeiro 2011.

EUROCODE 3 – Design of Steel Structures, 2005.